

## 投影莫尔条纹三维表面形状测量的方法和装置

### 技术领域

本发明涉及三维表面形状测量的方法和装置，特别是采用投影莫尔干涉计量的原理绝对测量物体的三维表面形状的方法及其装置。

5

### 背景技术

三维表面形状测量是工程技术界倍受关注的热门问题。目前流行的三维表面形状测量手段有逐点测量的接触式三坐标测量机、激光三坐标测量机。接触式三坐标测量机由机械探头在数控系统的驱动下扫描被测物体表面，给出物体各点的10 三维坐标。接触式坐标测量机的空间测量精度可以高于百分之一毫米。由于机械探头扫描时需对物体施加一定的接触力，数控系统移动需要一定的时间，因此接触式三坐标测量机测量速度较慢。激光三坐标测量机改机械探头为光学探头，激光光斑在数控系统的驱动下扫描被测物体表面。在空间测量精度有所损失的前提下加快了测量速度。但是测量速度的提高受制于数控系统运动速度的限制。若要15 大幅度地提高测量速度全场测量是较为理想的图径。

投影莫尔是指将主光栅投射于物体表面后，与子光栅干涉后生成的干涉条纹。莫尔干涉计量技术是一种全场，非接触测量技术。莫尔干涉计量技术拥有许多全息干涉计量术所具备的测量能力。但是重要的是莫尔干涉计量技术的灵敏度可调，具有非凡的抗外部干扰能力。因此具有广阔的工程应用前景。由 Takasaki20 和 Meadows et al 首创的影像莫尔等高线法是一种前途广阔的光学方法。该方法的试验装置相当简单：将光栅放置在物体附近，透过光栅观察物体可见莫尔条纹图。该莫尔条纹图在某些条件下为物体表面等高线，可以用于测量物体表面形状。

该方法因受测物体的大小受制于栅的大小，所以对于测量小尺寸物体非常有用。

另一种方法是由 P. Benoit, Y. Yoshino, M. Suzuki 等人分别提出。该方法将栅线25 的影子投射于物体表面，通过另一光栅观察莫尔等高线条纹图。该方法称为投影莫尔干涉法，它对于测量大尺寸物体非常有用。在一定的条件下，两栅的差频条纹如同地形图上描绘大地的等高线一样将形成物体表面的等高线。八十年代初期图像处理技术成功地应用于条纹图处理，特别是以相移技术、去包裹技术为核心的条纹图分析技术使莫尔干涉计量技术拥有了实时测量能力。

根据 Meadows、Takasaki 和 Suzuki et al 的推导投影莫尔条纹在投影臂观察臂光学中心平行；投影栅与观察栅栅距相等；投影臂观察臂成像透镜焦距相等；投影栅到投影透镜，观察栅到观察透镜的距离相等的条件下为物体表面的等高线。

现有投影莫尔干涉测量系统如图 1 所示，其中光源 1 发出光线通过主光栅 2，  
5 主光栅 2 的栅线通过投影透镜 3 成象于被测物体 4，被测物体 4 通过观测透镜 5  
成象在子光栅 6 上并在其上生成莫尔条纹。摄像机 8 通过摄像机成像透镜 7 记录莫尔条纹。

但是长期困扰莫尔干涉计量技术的问题有两个。（1）该干涉条纹所描绘的物体表面的等高线是条纹级数的函数，等高线的高度差不是等间距的，它也是条纹级数的函数。  
10 因此若要绝对测量物体的三维表面形状必需准确测定莫尔条纹的绝对条纹级数。（2）投影光学系统、观察光学系统到物体的距离（物距）和到投影光栅观察光栅的距离（像距）需要精确测定。现有的投影莫尔测量系统无法精确给定上述参数，因此它们不得不将等高线的高度差作为常数，粗略测量物距像距。  
所以只能粗略测量物体的表面形状即绝对测量或精确检测物体表面形状的差异  
15 即相对测量。

### 发明目的

本发明的目的在于克服现有的投影莫尔条纹物体表面形状测量方法和装置的缺憾，设计一种新的投影莫尔干涉测量方法及其装置。所述的方法及装置在保持莫尔干涉计量技术实时测量特点的前提下实现投影莫尔干涉测量技术的高精度绝对测量。  
20

### 发明内容

为了实现上述目的，本发明采用的技术方案为：一种投影莫尔条纹三维表面形状测量装置，所述装置包括具有标志点和主光栅的投影仪，具有标志点和子光栅的观测仪，以及用于将任意成象位置处的投影仪的标志点、观测仪的标志点、投影仪投射到物体表面上的标志点组成直角三角形的两个坐标直线运动轴。  
25

其中，所述的用标志点建立的测量直角三角形的两个坐标直线运动轴包括与观测仪光轴重合的带有光栅尺的第一直线运动轴，垂直于观测仪光轴带有光栅尺的第二直线运动轴。投影仪光轴与第二直线运动轴相交成  $\gamma$  角。投影仪光轴与观  
30

测仪光轴相交成  $\theta$  角。 $\theta$  与  $\gamma$  角之合为 90 度。

本发明所述的测量装置还包括将图象信号数字化的图象采集板和处理数字化图象的计算机。

所述的投影仪包括光源、主光栅、标志点，以及可移动的投影成像透镜。其中所述的标志点可以位于主光栅之后，也可以与主光栅平行。

所述的观测仪包括一测量光路，所述测量光路包括摄像机、子光栅、与子光栅平行的可切入光路中的标志点，以及可移动观测成像透镜。

本发明中，所述的观测仪还可以包括测量光路和观察光路，所述的测量光路包括摄像机、子光栅、可移动观测成像透镜；观察光路包括接收标志点象的摄像机、用于 90 度改变光线方向的反射镜、标志点以及位于观测成像透镜后子光栅前将光线 90 度转向的方棱镜。

本发明中的投影仪及观测仪中所述的主、子光栅可以为方波或正弦波，所述的标志点可以为十字丝或圆环。

本发明中的投影仪的光源产生白光。

所述的投影仪中的可移动投影透镜包括投影透镜和推动投影透镜的线性定位器；观测仪中的可移动观测透镜包括观测透镜和推动观测透镜的线性定位器。

本发明中一种投影莫尔条纹三维表面形状的测量方法，包括以下步骤：

(1) 利用投影仪内的标志点、观测仪内的标志点以及投影仪投射到物体表面上的标志点建立直角三角形；

(2) 确定投影共轭距、观测共轭距；

(3) 求出投影物距、象距，以及观测物距、象距；

(4) 根据投影物距和象距、观测物距和象距自动聚焦投影透镜、观测透镜，在观测仪子光栅面上形成莫尔条纹；

(5) 根据相移算法、去包裹算法确定以投影到物体上的标志点为零相位的位相分布。

(6) 计算高度分布。

也就是说，首先利用投影仪内的标志点、观测仪内的标志点以及投影仪投射到物体表面上的标志点建立直角三角形；通过两个坐标直线运动轴和投影仪、观测仪的标志点测量某一成像位置处的投影物距、投影像距；观测物距、观测像距；

然后根据物体上的标志点确定零级条纹的位置；再通过相移算法、去包裹算法确

定物体表面全场的条纹级数；最后根据推导出的以物体上某一点为坐标参考点的投影莫尔干涉条纹与物体高度的对应关系精确计算出物体的三维表面形状。

其中所述直角三角形的建立包括如下步骤：把物体移动到充满观测仪视场，聚焦投影到物体上的标志点，将投影到物体上的标志点与观测仪内的标志点对准。?

所述确定投影共轭距、观测共轭距的步骤为：根据直角三角形一边一角求另两边，其中  $AE=AD/\tan\theta$ ； $DE=AD/\sin\theta$ ， $\theta$  为投影仪观测仪光轴间的夹角、 $\theta=\arctan R_2/R_1$ ， $AD$  为光栅尺测出的投影仪到观测仪之间的距离（组成直角三角形的第二直线运动轴的尺寸）， $R_1$  和  $R_2$  分别为光栅移动量；观测共轭距  $AE$  为观测仪子光栅到物体的距离，投影共轭距  $DE$  为投影仪主光栅到物体的距离。

然后，根据下述方程求出投影物距、象距，观测物距、象距：

$$\begin{aligned} Z_C + Z_{CF} &= \frac{AD}{\tan\theta} & \frac{1}{Z_C} + \frac{1}{Z_{CF}} &= \frac{1}{F_1} \\ L_p + L_{PF} &= \frac{AD}{\sin\theta} & \frac{1}{L_p} + \frac{1}{L_{PF}} &= \frac{1}{F_2} \end{aligned}$$

其中  $Z_C$  为观测物距、 $Z_{CF}$  为观测象距； $L_{PF}$  为投影象距、 $L_p$  为投影物距、 $F_1$  为观测仪焦距、 $F_2$  为投影仪焦距。

本发明中根据投影物距和象距、观测物距和象距自动聚焦的步骤为移动投影透镜、观测透镜到成像位置，在观测仪子光栅面上形成莫尔条纹。

最后通过下列公式计算高度分布：

$$\begin{aligned} Z &= -\frac{\left(\frac{\varphi}{2\pi f} + X_c\right)D - L_{PF}B}{\left(\frac{\varphi}{2\pi f} + X_c\right)C - L_{PF}A} \\ X_z &= \frac{Z + Z_C}{Z_{CF}} X_c \\ Y_z &= \frac{Z + Z_C}{Z_{CF}} Y_c \end{aligned}$$

其中  $X_z$ 、 $Y_z$ 、 $Z$  为物体某一点的位置坐标、 $f$  为光栅频率、 $\varphi$  为位相。

$$\begin{aligned} A &= Z_C Z_{CF} \sin\theta + Z_C X_C \cos\theta & B &= Z_C^2 X_C \cos\theta \\ C &= Z_C Z_{CF} \cos\theta - Z_C X_C \sin\theta & D &= -Z_C^2 X_C \sin\theta + Z_C Z_{CF} L_p \end{aligned}$$

下面结合附图和实施例详细描述本发明，所述的实施例用于描述本发明而不是限制本发明。

## 附图说明

图 1 是现有投影莫尔干涉测量系统示意图

图 2 是本发明投影莫尔条纹三维表面形状测量装置的示意图；

图 3 是本发明三维表面形状测量装置一个实施例的投影仪示意图；

5 图 4 是本发明三维表面形状测量装置一个实施例的观测仪示意图；

图 5 是本发明的参数计算示意图；

图 6 是本发明的投影莫尔干涉条纹测量原理示意图；

图 7 是本发明投影莫尔条纹三维表面形状测量方法的流程图；

图 8 是本发明三维表面形状测量装置另一个实施例的投影仪示意图；

10 图 9 是本发明三维表面形状测量装置的另一个实施例的观测仪的示意图。

参见图 2，本发明投影莫尔条纹三维表面形状测量装置包括观测仪 20，沿观  
测仪 20 光轴方向的第一直线运动轴 40 和第一光栅尺 60，安装在第一直线运动轴  
40 滑块上的旋转载物台 30 和固定在旋转载物台 30 上的被测物体 80，与第一直  
线运动轴 40 垂直的第二直线运动轴 50 和第二光栅尺 70，光轴与直线运动轴 50  
15 成  $\gamma$  角的投影仪 10，定位第一直线运动轴 40 和第一光栅尺 60、第二直线运动轴  
50 和第二光栅尺 70 及观测仪 20 的大理石平台 90。所述测量装置还包括用于数  
字化图象信号的图象采集板 100，处理数字图象的计算机 110。

20 投影仪 10 可以如图 3 所示，包括聚光镜 12 前的光源 11，位于标志点 14 前  
的主光栅 13，投影透镜 15。主光栅 13 在光栅栅面内的移动由线性定位器 17 控  
制，投影透镜 15 沿光轴方向的移动由线性定位器 16 控制。

投影仪 10 中，所述的主光栅与标志点也可以如图 8 所示平行排列。

观测仪 20 包括测量光路，所述测量光路包括摄像机 21，子光栅标志点切换  
器 23，可移动观测成像透镜 29。

25 如图 9 所示，测量光路包括用于接收子光栅面上莫尔条纹的摄像机 21 和摄  
像机成像透镜 22，子光栅标志点切换器 23，可移动成像透镜 29。观测透镜 29 光  
轴方向的移动由线性定位器 29A 控制。

30 观测仪 20 还可以如图 4 所示，包括测量光路和观察光路。所述观察光路包  
括观测透镜 29，控制观测透镜 29 光轴方向移动的线性定位器 29A，从测量光路  
中垂直分光的、位于成像透镜 29 后子光栅 23 前的方棱镜 24。位于方棱镜 24 和  
反射镜 26 之间的标志点 25，90 度改变光路方向的反射镜 26，成像标志点 25 的

观察摄像机 28 和观察摄像机成像透镜 27。所述测量光路包括观测透镜 29，控制观测透镜 29 光轴方向移动的线性定位器 29A，子光栅 23，用于接收子光栅面上莫尔条纹的摄像机 21 和摄像机成像透镜 22。

参见图 7 所示的本发明投影莫尔条纹三维表面形状测量的方法流程图。测量时，首先将被测物体 80 沿第一直线运动轴 40 移动至距观测仪 20 的最近处，调整投影仪 10 的成像透镜使标志点清晰成像于被测物体 80 表面。调整观测仪 20 的成像透镜使物体 80 及其上的标志点清晰成像。沿第二直线运动轴 50 移动投影仪 10 使投射于物体 80 上的标志点与观测仪 20 内的标志点重合。此时由投影仪标志点、观测仪标志点、物体 80 上的标志点投影点组成三角形  $\triangle ABC$  (如图 5)。由于第一直线运动轴 40、第二直线运动轴 50 相交成直角，投影仪标志点、观测仪标志点的交线 AB 与第二直线运动轴 50 的运动方向重合， $\triangle ABC$  为直角三角形。在直角三角形  $\triangle ABC$  中，测量直角边 AB 和投影仪观测仪光轴夹角  $\theta$ 。此时将第一光栅尺 60、第二光栅尺 70 清零。当沿第一直线运动轴 40 将物体移动至 E 点，第一光栅 60 移动量为  $R_1$ ；沿第二直线运动轴 50 将投影仪 10 移动至 D 点，第二光栅 70 移动量为  $R_2$ 。此时投影仪标志点、观测仪标志点与物体上参考点 E 组成新的直角三角形  $\triangle ADE$ 。设观测透镜的焦长为  $F_1$ 、物距为  $Z_c$ 、象距为  $Z_{CF}$ ；投影透镜的焦长为  $F_2$ 、物距为  $L_p$ 、象距为  $L_{PF}$ ，则有： )

$$AD = AB + R_2 \quad (1)$$

$$\frac{1}{Z_c} + \frac{1}{Z_{CF}} = \frac{1}{F_1} \quad (2)$$

$$Z_c + Z_{CF} = \frac{AD}{\tan \theta} \quad (3)$$

$$L_p + L_{PF} = \frac{AD}{\sin \theta} \quad (4)$$

$$\frac{1}{L_p} + \frac{1}{L_{PF}} = \frac{1}{F_2} \quad (5)$$

根据方程 (2)、(3) 解出  $Z_c$ ， $Z_{CF}$ ，方程 (4)、(5) 解出  $L_{PF}$ ， $L_p$ 。然后进行自动调焦。

即移动投影仪 10 的投影透镜至  $L_{PF}$  处，使投影仪光源所发出光线通过主光栅

后清晰成像于被测表面 80 上；移动观察仪成像透镜至  $Z_{cp}$  处使被测表面 80 与其上的投影光栅栅线清晰成像于子光栅上并在子光栅上形成干涉条纹。此干涉条纹既为莫尔条纹。摄像机将莫尔条纹图象输入图像采集板 100。数字化的条纹图象输入计算机 110。这样得到一幅数字化的干涉条纹图。移动主光栅使光栅在垂直光轴的方向移动四分之一栅距、四分之二栅距、四分之三栅距处时，接收摄像机分别采样 4 幅条纹图，经图像采集板 100 送入计算机 110。利用相移算法求出  $0 - 2\pi$  的相位图。

$$I_1 = I_0 + A \sin(\varphi + 0) \quad (6)$$

$$I_2 = I_0 + A \sin(\varphi + \frac{\pi}{2}) \quad (7)$$

$$I_3 = I_0 + A \sin(\varphi + \pi) \quad (8)$$

$$I_4 = I_0 + A \sin(\varphi + \frac{3\pi}{2}) \quad (9)$$

$$\varphi = \operatorname{tg}^{-1} \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \quad (10)$$

其中  $I_0$  为背景光强，A 为条纹对比度， $\varphi$  为每点的位相。

再利用去包裹算法解出相位图其原理如下：

相移后的相位图利用判据  $\varphi_2 - \varphi_1 \geq \pi$  则  $\varphi_2 = \varphi_1 - 2\pi$ ； $\varphi_2 - \varphi_1 \leq -\pi$  则  $\varphi_2 = \varphi_1 + 2\pi$  判断，可以去包裹成连续变化的位相分布。

如果已知观测物距  $Z_c$ 、观测像距  $Z_{cp}$ 、投影像距  $L_{pp}$ 、投影物距  $L_p$ 、投影仪观测仪光学中心夹角  $\theta$ 、光栅栅距  $P_p = P_c = P$ 、利用推导的投影莫尔高度与位相公式可以计算被测物体的高度分布。

为公式的通用性，主光栅与子光栅光学中心的连线成任意三角形。

分别在投影栅、参考平面和参考栅上建立如图 6 所示的坐标系统，并设投影 25 栅节距为  $P_p$ （或空间频率为  $f_p$ ），参考栅节距为  $P_c$ （或空间频率为  $f_c$ ）。

投影栅方程为：  $I_p = \sin(2\pi f_p X_p)$  (11)

（设初始位相为 0，如为其它非弦函数的形式，可用 Fourier 级数进行展开，但要能分离出一级项，以便于对位相进行分析）

在参考平面上， $X$  和  $X_p$  对应，则有如下关系：

$$30 \quad \operatorname{tg}\alpha = \frac{X_p}{L_{pp}} \quad (12)$$

$$\frac{X}{\sin \alpha} = \frac{L_p}{\sin(\frac{\pi}{2} - \theta + \alpha)} = \frac{L_p}{\cos \theta \cos \alpha + \sin \theta \sin \alpha} \quad (13)$$

既:  $X = \frac{L_p}{\cos \theta \cos \alpha + \sin \theta}$

由方程 12 和 13 得:  $X_p = \frac{XL_{PF} \cos \theta}{L_p - X \sin \theta} \quad (14)$

由上式可知  $X_p$  和  $X$  具有非线性的关系, 这导致投影在参考面上的栅线将发生  
5 畸变, 不再是等间距的。其方程可写为:

$$I = I_p = \sin(2\pi f_p \frac{XL_{PF} \cos \theta}{L_p - X \sin \theta}) \quad (15)$$

这即是参考平面上的栅线方程。

我们再考虑接收系统, 对于接收系统, 投影的栅线成像于参考栅线所在的平面处。由图可知:  $\frac{X}{Z_c} = \frac{X_c}{Z_{CF}}$  (16), 即  $X = \frac{Z_c}{Z_{CF}} X_c$  (17)

10 将 17 式代入 15 式可得成像于参考栅平面处的投影栅像的光强分布为:

$$I_c = \sin(2\pi f_p \frac{X_c Z_c L_{PF} \cos \theta}{Z_{CF} L_p - Z_c X_c \sin \theta}) \quad (18)$$

如果参考栅的方程为  $I_{CR} = \sin(2\pi f_c X_c + \Delta)$  (19), 则  $I_c$  和  $I_{CR}$  形成的混和光强 (莫尔条纹) 分布为:

$$\begin{aligned} I_{CCD} &= I_c \times I_{CR} = \sin(2\pi f_p \frac{X_c Z_c L_{PF} \cos \theta}{Z_{CF} L_p - Z_c X_c \sin \theta}) \times \sin(2\pi f_c X_c + \Delta) \\ &= \frac{1}{2} \left\{ \cos \left[ 2\pi f_p \frac{X_c Z_c L_{PF} \cos \theta}{Z_{CF} L_p - Z_c X_c \sin \theta} - (2\pi f_c X_c + \Delta) \right] - \cos \left[ 2\pi f_p \frac{X_c Z_c L_{PF} \cos \theta}{Z_{CF} L_p - Z_c X_c \sin \theta} + (2\pi f_c X_c + \Delta) \right] \right\} \end{aligned} \quad (20)$$

运用投影莫尔法进行形状测试时, 对单独的  $I_c$  和  $I_{CR}$  要求 CCD 不可分辨其栅线结构, 公式 20 中第二项为高频项, CCD 不可分辨, 为均匀光场, CCD 仅可以分辨第一项中的低频条纹。故可写为:

$$I_{CCD} = \frac{1}{2} \cos \left[ 2\pi f_p \frac{X_c Z_c L_{PF} \cos \theta}{Z_{CF} L_p - Z_c X_c \sin \theta} - (2\pi f_c X_c + \Delta) \right] \quad (21)$$

20 一般取  $f_p = f_c = f$ 。

如果将物体置于参考面后, 如图 6 所示, 并取 0 点与物体上某一点 (标记点, 即物体上该点高度为 0) 重合, 则有:

$$\frac{X'}{Z_c} = \frac{X - X' - \Delta X}{Z} = \frac{X - \Delta X}{Z + Z_c} = \frac{X_z}{Z + Z_c} \quad (22)$$

$$X' = \frac{Z_c}{Z + Z_c} (X - \Delta X) \quad (23)$$

由图中几何关系可知:  $\frac{Z}{\Delta X} = \tan(\frac{\pi}{2} - \theta + \alpha)$ , 即  $\Delta X = Z \frac{1 - \cot\theta \tan\alpha}{\cot\theta + \tan\alpha}$  (24)

方程 24 可化为:  $\Delta X = Z \frac{\sin\theta - \cos\theta \tan\alpha}{\cos\theta + \sin\theta \tan\alpha}$  (25)

由方程 13 可得:  $X = \frac{L_p \tan\alpha}{\cos\theta + \sin\theta \tan\alpha}$  (26)

将 25, 26 及 12 式代入到方程 23 中并化简得:

$$X_p = L_{pf} \times \frac{X'(Z + Z_c) \cos\theta + ZZ_c \sin\theta}{Z_c L_p + ZZ_c \cos\theta - X'(Z + Z_c) \sin\theta} \quad (27)$$

由于  $X' = \frac{Z_c}{Z_{cf}} X_c$ , 代入 27 式可得:

$$X_p = L_{pf} \times \frac{Z_c X_c (Z + Z_c) \cos\theta + ZZ_c Z_{cf} \sin\theta}{Z_c Z_{cf} L_p + ZZ_c Z_{cf} \cos\theta - Z_c X_c (Z + Z_c) \sin\theta} \quad (28)$$

成像于参考栅平面处的投影栅线像的光强分布受高度 Z 的调制后可写为如下

10 形式:

$$\begin{aligned} I_c &= \sin(2\pi f_p \times L_{pf} \times \frac{Z_c X_c (Z + Z_c) \cos\theta + ZZ_c Z_{cf} \sin\theta}{Z_c Z_{cf} L_p + ZZ_c Z_{cf} \cos\theta - Z_c X_c (Z + Z_c) \sin\theta}) \\ &= \sin(2\pi f_p \times L_{pf} \times \frac{Z(Z_c Z_{cf} \sin\theta + Z_c X_c \cos\theta) + Z_c^2 X_c \cos\theta}{Z(Z_c Z_{cf} \cos\theta - Z_c X_c \sin\theta) - Z_c^2 X_c \sin\theta + Z_c Z_{cf} L_p}) \end{aligned} \quad (29)$$

参考栅线方程同样可以写为  $I_{cr} = \sin(2\pi f_c X_c + \Delta)$  (9), 由  $I_{ccd} = I_c \times I_{cr}$  及  
高频栅线结构不可分辨可得:

$$I_{ccd} = \frac{1}{2} \cos \left[ 2\pi f_p L_{pf} \frac{Z(Z_c Z_{cf} \sin\theta + Z_c X_c \cos\theta) + Z_c^2 X_c \cos\theta}{Z(Z_c Z_{cf} \cos\theta - Z_c X_c \sin\theta) - Z_c^2 X_c \sin\theta + Z_c Z_{cf} L_p} - (2\pi f_c X_c + \Delta) \right] \quad (30)$$

15

一般取  $f_p = f_c = f$ 。对于 30 式, 如果  $Z = 0$ , 可退化为 21 式, 这也说明了以上推导的正确性。

其位相可以写为:

$$\phi = 2\pi f_p L_{pf} \frac{ZA + B}{ZC + D} - (2\pi f_c X_c + \Delta) \quad (31)$$

20 其中

$$A = Z_c Z_{cf} \sin\theta + Z_c X_c \cos\theta \quad B = Z_c^2 X_c \cos\theta$$

$$C = Z_c Z_{cf} \cos\theta - Z_c X_c \sin\theta \quad D = -Z_c^2 X_c \sin\theta + Z_c Z_{cf} L_p$$

对于 31 式, 计算坐标原点处的位相:  $X_c = 0, Y_c = 0, Z = 0$ , 代入 21 式得  $\phi_o = -\Delta$ ,  
由于是附加在所有位相上的一个常数, 可以将之消除, 即对所有的位相进行如下

的操作即可：

$$\varphi = \varphi - \varphi_0 \quad (31-1),$$

这时全场位相就可以写为：

$$\varphi = 2\pi f_p L_{PF} \frac{ZA + B}{ZC + D} - 2\pi f_c X_c \quad (32)$$

5 若  $f_p = f_c = f$ , 则可求出 Z 为：

$$Z = -\frac{\left(\frac{\varphi}{2\pi f} + X_c\right)D - L_{PF}B}{\left(\frac{\varphi}{2\pi f} + X_c\right)C - L_{PF}A} \quad (33)$$

由 22 式及公式 17 综合可得：

$$X_z = \frac{Z + Z_c}{Z_c} X' = \frac{Z + Z_c}{Z_c} \cdot \frac{Z_c}{Z_{CF}} X_c = \frac{Z + Z_c}{Z_{CF}} X_c \quad (34)$$

$$Y_z \text{ 与 } X_z \text{ 具有同样的比例关系, 所以有 } Y_z = \frac{Z + Z_c}{Z_{CF}} Y_c \quad (35)$$

10 以上的推导得出 ( $X_z$ ,  $Y_z$ ,  $Z$ ) 的完整计算公式：

$$Z = -\frac{\left(\frac{\varphi}{2\pi f} + X_c\right)D - L_{PF}B}{\left(\frac{\varphi}{2\pi f} + X_c\right)C - L_{PF}A}$$
$$X_z = \frac{Z + Z_c}{Z_{CF}} X_c \quad (36)$$
$$Y_z = \frac{Z + Z_c}{Z_{CF}} Y_c$$

运用以上公式时, 先进行高度转换, 求出高度分布后再应用 36 式的后两个公式进行位置变换, 求出  $X_z$ 、 $Y_z$ , 如此重复, 即可以得到三维物体的表面形状。

### 具体实施方案

#### 实施例 1

如图 2 所示 20 为安装在大理石平台 90 上的观测仪。40 为沿观测仪 20 的光轴方向安装在大理石平台 90 台面上的长度 1000 毫米的日本 THK 公司制造的由手轮驱动的直线运动轴 (带防尘罩), 在该直线运动轴的滑块上固定有可做 360 度旋转定位的载物台 30。载物台 30 上安装被测物体—航空发动机叶片 80。平行于第一直线运动轴 40, 安装有第一光栅尺 60。与第一直线运动轴 40 垂直安装长度

400 毫米的日本 THK 公司制造的由手轮驱动的第二直线运动轴（带防尘罩）50。在第二直线运动轴 50 的滑块上固定有投影仪 10。投影仪 10 的光轴与第二直线运动轴 50 相交成 γ 角。平行于第二直线运动轴 50，安装有第二光栅尺 70。投影仪 10 通过电缆 C07 与电源 190 相连。观测仪 20 的测量摄像机 21、观察摄像机 28 5 通过电缆 C08、C09 与 Matrox Pulser 4 通道图像采集板 100 相连，图像采集板 100 插入计算机 110。投影仪 10 的投影透镜线性定位器 16 是德国 PI 公司的线性定位器 M224.20，光栅线性定位器 17 为德国 PI 公司线性定位器 M222.20。观测仪 20 的观测成像透镜线性定位器 29A 是德国 PI 公司的线性定位器 M224.20。它们分别通过电缆 C01、C02、C03 与德国 PI 公司 4 通道直流电机控制板 180 (C—10 842.40) 相连，后者插入计算机 110。

投影仪 10 如图 3 所示，包括聚光镜 12 前的光源 11，位于标志点 - 十字丝 14 前的主光栅 13，投影透镜 15。主光栅 13 在光栅栅面内的移动由线性定位器 17 控制，投影透镜 15 沿光轴方向的移动由线性定位器 16 控制。

观测仪 20 如图 4 所示，它包括测量光路和观察光路。所述观察光路包括观测透镜 29，控制观测透镜 29 光轴方向移动的线性定位器 29A，从测量光路中垂直分光的、位于观测透镜 29 后子光栅 23 前的方棱镜 24。位于方棱镜 24 和反射镜 26 之间的标志点 - 十字丝 25，90 度改变光路方向的反射镜 26，成象标志点 - 十字丝 25 的观察摄像机 28 和观察摄像机成像透镜 27。所述测量光路包括观测透镜 29，控制观测透镜 29 光轴方向移动的线性定位器 29A，子光栅 23，用于接收 20 子光栅面上莫尔条纹的摄像机 21 和摄像机成像透镜 22。

测量时，首先移动投影成像透镜线性定位器 16，使投影透镜 15 对十字丝 14 清晰成像。调整观测仪成像透镜线性定位器 29A，使通过投影成像透镜 15 成像于物体上的十字丝清晰成像于观察摄像机 28 的靶面上。调整第二直线运动轴 50 使物体上的十字丝的像与观测仪十字丝 25 的像重合。此时参照 图 7 进行步骤(2) 25 (3)(4)后，进行自动调焦，即调整投影成像透镜线性定位器 16，使投影透镜 15 对栅线 13 清析成像。微调观测成像透镜线性定位器 29A，使观测透镜 29 对栅线 13 投射在物体上的象清晰成像；然后参照 图 7(5)(6)(7)(8) 步骤，也就是移动主光栅使光栅在垂直光轴的方向移动四分之一栅距、四分之二栅距、四分之三栅距处时，观测摄像机分别采样 4 幅条纹图，用摄像机将莫尔条纹图象输入图像采集板 100，数字化的条纹图象输入计算机 110。这样得到一幅

数字化的干涉条纹图。利用相移算法求出  $0 - 2\pi$  的相位图。最后以标志点零相位展位为相，按照公式计算物体的高度分布，如此重复求出各个点的 Xz、Yz、Z，即可以得到三维物体的表面形状。测量精度为  $\pm 0.01\text{mm}$ 。

5

## 实施例 2

如图 2 所示，20 为安装在大理石平台 90 上的观测仪（观测仪如图 9）。40 为沿观测仪 20 的光轴方向安装在大理石平台 90 台面上的长度 1000 毫米的日本 THK 公司制造的由手轮驱动的第一直线运动轴（带防尘罩），在该直线运动轴的滑块上固定有可做 360 度旋转定位的载物台 30。载物台 30 上安装被测物体—航空发动机叶片 80。平行于直线运动轴 40，安装有第一光栅尺 60。与第一直线运动轴 40 垂直安装长度 400 毫米的日本 THK 公司制造的由手轮驱动的第二直线运动轴（带防尘罩）50。在直线运动轴 50 的滑块上固定有投影仪 10（投影仪如图 8）。  
10 投影仪 10 的光轴与第二直线运动轴 50 相交成  $\gamma$  角。平行于第二直线运动轴 50，安装有第二光栅尺 70。投影仪 10 通过电缆 C07 与电源 190 相连。观测仪 20 的测量摄像机 21 通过电缆 C08 与 4 通道图像采集板 100 相连，图像采集板 100 插入计算机 110。投影仪 10 的投影透镜线性定位器 16 是德国 PI 公司的线性定位器 M224.20，光栅线性定位器 17 为德国 PI 公司线性定位器 M222.20。观测仪 20 的观测成像透镜线性定位器 29A 是德国 PI 公司的线性定位器 M224.20。它们分别通过电缆 C01、C02、C03 与德国 PI 公司 4 通道直流电机控制板 180 (C-842.40)  
15 相连，后者插入计算机 110。  
20

投影仪 10 如图 8 所示，包括光源 11，聚光镜 12，主光栅圆环切换器 13，投影透镜 15，投影透镜线性定位器 16，光栅线性定位器 17。

观测仪 20 如图 9 所示，包括测量摄像机 21，测量摄像机成像透镜 22，子光栅圆环切换器 23，观测成像透镜 29，观测成像透镜线性定位器 29A。

25 测量时，将投影仪主光栅圆环切换器 13 的圆环切入光路。移动投影成像透镜线性定位器 16，使成像透镜 15 对圆环清晰成像。将观测仪子光栅圆环切换器 23 的圆环切入光路。调整观测成像透镜线性定位器 29A，调整短导轨，使通过测量摄像机成像透镜 29 成象于测量摄像机 21 靶面上的投影圆环与观察仪圆环重合。此时 进行 图 7 的(2) (3) (4) 步后进行自动调焦。既将投影仪 10 的光栅圆环切换器 13 的主光栅切入光路。将观测仪 20 的子光栅圆环切换器 23 的子光

栅切入光路。进行图7步骤(5)(6)(7)(8)，即可以得到三维物体的表面形状。具体参见实施例1。测量精度为 $\pm 0.01\text{mm}$ 。

通过本发明的投影莫尔条纹三维表面形状测量装置和方法，利用莫尔条纹干涉装置及方法生成含有被测物体表面高度分布信息的莫尔条纹图象，通过图象采集板将摄像机采集的光学图象的光强数据输入计算机，由计算机对莫尔条纹图象进行数字预处理后，利用相移算法对多幅相移后的莫尔条纹图象进行处理，得到用数值表征被测物体表面高度信息的相位图及被测物体表面各点的X、Y、Z坐标值，从而完成物体三维表面形状测量，显示被测物体的动态三维表面形状并输出测量的表面形状数据。本发明实现了高精度的全场三维测量物体的表面形状的绝对测量，测量精度为 $\pm 0.01\text{mm}$ ，是现有测量装置的10~5倍，并可以在30s钟时间内完成测量。适用于复杂形状的三维物体如发动机高精度、高速度测量。

15

20

25

30

## 权利要求书

1. 一种投影莫尔条纹三维表面形状测量装置，其特征在于所述装置包括具有标志点和主光栅的投影仪，具有标志点和子光栅的观测仪，以及用于将成象位置处的投影仪的标志点、观测仪的标志点、投影仪投射到物体表面上的标志点组成直角三角形的两个坐标直线运动轴。  
5
2. 如权利要求 1 所述的投影莫尔条纹三维表面形状测量装置，其特征在于所述的直角测量三角形的两个坐标直线运动轴包括与观测仪光轴重合的带有光栅尺的第一直线运动轴，垂直于观测仪光轴带有光栅尺的第二直线运动轴；投影仪光轴与垂直于观测仪光轴带有光栅尺的第二直线运动轴相交成  $\gamma$  角，投影仪光轴与观测仪光轴相交成  $\theta$  角， $\theta$  与  $\gamma$  角之和为 90 度。  
10
3. 如权利要求 1 或 2 所述的投影莫尔条纹三维表面形状测量装置，其特征在于所述的测量装置还包括将图象信号数字化的图象采集板和处理数字化图象的计算机。  
15
4. 如权利要求 1 或 2 所述的投影莫尔条纹三维表面形状测量装置，其特征在于所述的投影仪包括光源、主光栅、标志点，以及可移动的投影成象透镜。  
5. 如权利要求 4 所述的投影莫尔条纹三维表面形状测量装置，其特征在于所述的标志点位于主光栅之后或与主光栅平行。  
20
6. 如权利要求 1 或 2 所述的投影莫尔条纹三维表面形状测量装置，其特征在于所述的观测仪包括测量光路，所述测量光路包括摄像机、子光栅、与子光栅平行的可切入光路中的标志点，以及可移动观测成像透镜。  
25
7. 如权利要求 1 或 2 所述的投影莫尔条纹三维表面形状测量装置，其特征在于所述的观测仪包括测量光路和观察光路，所述的测量光路包括摄像机、子光栅、可移动观测成像透镜；观察光路包括接收标志点象的摄像机、用于 90 度改变光线方向的反射镜、标志点、以及位于观测成像透镜后子光栅前将光线 90 度转向的方棱镜。  
30
8. 如权利要求 4、5、6、7 任何一项所述的投影莫尔条纹三维表面形状测量装置，其特征在于所述的主、子光栅为方波或正弦波，标志点为十字丝或圆环。  
9. 如权利要求 4、5、6、7 任何一项所述的投影莫尔条纹三维表面形状测量装置，其特征在于所述的光源产生白光。

10. 如权利要求 4、6、7 任何一项所述的投影莫尔条纹三维表面形状测量装置，其特征在于所述的投影仪中的可移动投影透镜包括投影透镜和推动投影透镜的线性定位器；观测仪中的可移动观测成像透镜包括观测成像透镜和推动观测成像透镜的线性定位器。

5 11. 如权利要求 1 所述的投影莫尔条纹三维表面形状测量装置，其特征在于所述的装置由观测仪，沿观测仪光轴方向的第一直线运动轴和第一光栅尺，安装在第一直线运动轴滑块上的支撑被测物体的旋转载物台，与第一直线运动轴垂直的第二直线运动轴和第二光栅尺，光轴与第二直线运动轴成  $\gamma$  角的投影仪，定位第一直线运动轴和第一光栅尺、第二直线运动轴和第二光栅尺及放置上述仪器的  
10 平台，将图象信号数字化的图象采集板，和处理数字化图象的计算机构成；其中投影仪光轴与观测仪光轴相交成  $\theta$  角。  
15

12. 如权利要求 11 所述的三维表面形状测量装置，其特征在于所述的投影仪包括聚光镜前的光源，位于标志点前或平行于标志点的主光栅，投影透镜。主光栅在光栅栅面内的移动由线性定位器控制，投影透镜 15 沿光轴方向的移动由线性定位器控制。  
15

13. 如权利要求 11 所述的三维表面形状测量装置，其特征在于所述的观测仪  
20 包括测量光路。测量光路包括用于接收子光栅面上莫尔条纹和标志点的摄像机  
21 和摄像机成像透镜 22，子光栅标志点切换器 23，可移动成像透镜 29。成像透  
镜 29 光轴方向的移动由线性定位器 29A 控制。  
25

14. 如权力要求 11 所述的三维表面形状测量装置，其特征在于所述的观测仪  
20 还包括观察光路，所述观察光路包括接收标志点 25 的象的摄像机成像透镜 27、  
摄像机 28，用于 90 度改变光线方向的反射镜 26。测量光路和观察光路相互垂  
直，其转向由位于成像透镜 29 后子光栅 23 前的方棱镜 24 实现。观测透镜 29 光  
轴方向的移动由线性定位器 29A 控制。  
30

15. 权利要求 1 所述的一种投影莫尔条纹三维表面形状测量方法，其特征在  
于所述方法包括以下步骤：

- (1) 利用投影仪内的标志点、观测仪内的标志点以及投影仪投射到物体表面  
上的标志点建立直角三角形；
- (2) 确定投影共轭距、观测共轭距；
- (3) 求出投影物距、象距，以及观测物距、象距；

(4) 根据投影物距和象距、观测物距和象距自动聚焦投影透镜、观测透镜，在观测仪子光栅面上形成莫尔条纹；

(5) 根据相移算法、去包裹算法确定以投影到物体上的标志点为零相位的位相分布。

5 (6) 计算高度分布。

16. 如权利要求 15 所述的测量方法，其特征在于所述直角三角形的建立包括如下步骤：把物体移动到充满观测仪视场，聚焦投影到物体上的标志点，将投影到物体上的标志点与观测仪内的标志点对齐。

10 17. 如权利要求 15 所述的测量方法，其特征在于确定投影共轭距、观测共轭距的步骤为：根据直角三角形一边一角求另两边，既  $AE=AD/\tan\theta$ ;  $DE=AD/\sin\theta$ ，其中  $\theta$  为投影仪观测仪光轴间的夹角、 $\theta=\arctg R_2/R_1$ ， $AD$  为光栅尺测出的投影仪到观测仪之间的距离， $R_1$  和  $R_2$  分别为光栅移动量，观测共轭距  $AE$  为观测仪子光栅到物体的距离，投影共轭距  $DE$  为投影仪主光栅到物体的距离。

15 18. 如权利要求 15 所述的测量方法，其特征在于根据下述方程求出投影物距象距、观测物距象距：

$$Z_c + Z_{cf} = \frac{AD}{\tan\theta} \quad \frac{1}{Z_c} + \frac{1}{Z_{cf}} = \frac{1}{F_1}$$
$$L_p + L_{pf} = \frac{AD}{\sin\theta} \quad \frac{1}{L_p} + \frac{1}{L_{pf}} = \frac{1}{F_2}$$

20 其中  $Z_c$  为观测物距、 $Z_{cf}$  为观测象距； $L_{pf}$  为投影象距、 $L_p$  为投影物距， $F_1$  为观  
测透镜的焦长， $F_2$  为投影透镜的焦长。

19. 如权利要求 15 所述的测量方法，其特征在于根据投影物距和象距、观测物距和象距移动投影透镜、观测透镜，在观测仪子光栅面上形成莫尔条纹。

20 20. 如权利要求 15 所述的根据公式计算高度分布其特征在于通过下列公式计算高度分布：

$$25 Z = -\frac{\left(\frac{\phi}{2\pi f} + X_c\right)D - L_{pf}B}{\left(\frac{\phi}{2\pi f} + X_c\right)C - L_{pf}A}$$

$$X_z = \frac{Z + Z_c}{Z_{cf}} X_c$$

$$Y_z = \frac{Z + Z_c}{Z_{cf}} Y_c$$

其中  $X_z, Y_z, Z$  为物体某一点的位置坐标；且，

$$A = Z_c Z_{cf} \sin \theta + Z_c X_c \cos \theta \quad B = Z_c^2 X_c \cos \theta$$

$$C = Z_c Z_{cf} \cos \theta - Z_c X_c \sin \theta \quad D = -Z_c^2 X_c \sin \theta + Z_c Z_{cf} L_p;$$

5 其中  $f$  为光栅频率； $\phi$  为位相； $Z_c$  为观测物距、 $Z_{cf}$  为观测象距； $L_p$  为投影象距、 $L_p$  为投影物距； $\theta$  为投影仪光轴与观测仪光轴夹角。

10

15

20

25

## 摘要

本发明公开了通过投影莫尔干涉条纹测量三维表面形状的方法和装置。所述装置包括投射标志点和主光栅栅线的投影仪，接收投射到物体表面上的标志点和光栅栅线的观测仪以及两坐标直线运动轴，用所述的两坐标直线运动轴和投影仪、观测仪的标志点测量某一成像位置处的投影物距、投影像距；观测物距、观测像距；然后根据物体上标志点确定零级条纹的位置；再通过相移算法、去包裹算法确定物体表面全场的条纹级数；最后根据推导出的以物体上某一点为坐标参考点的投影莫尔干涉条纹与物体高度的对应关系精确计算出物体的三维表面形状。

10

15

20

25